

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

_____ **Анатолій ОРЛОВ**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2020 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка

на тему: **«Мікроелектронні приймачі електромагнітного випромінювання в
фітоактивному спектральному діапазоні»**

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-61

_____ **Галюк Ілля Євгенович** _____

(підпис)

Керівник: _____ **проф., к.т.н., Борисов О.В.** _____

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

_____ **Георгій СВІЧНИКОВ** _____

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО _____

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

Завдання на дипломну роботу

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 153 Мікро-та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту**

групи ДП-61 Галюку Іллі Євгеновичу _____

1. Тема роботи: «Мікроелектронні приймачі електромагнітного випромінювання в фітоактивному спектральному діапазоні» _____

керівник роботи: Борисов О.В., професор, кандидат технічних наук,

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом роботи: _____

3. Вихідні дані до роботи:

3.1. Спектральний діапазон випромінювачів та приймачів фітоактивного діапазону: 380 нм – 700 нм.

3.2. Кількість каналів регульовані кольором: Три (червоний, зелений, синій).

3.3. Вихідні інтерфейси: аналоговий для RGB – первинного мікроелектронного перетворювача, цифровий – для блоку задавання режимів.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

4.1 Огляд систем енергоефективного штучного освітлення в фітоактивному спектральному діапазоні електромагнітного випромінювання.

4.2 Аналіз електричних та оптичних технічних характеристик сучасних світлодіодних джерел в фітоактивному діапазоні.

4.3 Вибір оптимальних мікроелектронних приймачів для сучасних систем штучного освітлення, аналіз електронних схем обробки сигналу.

4.4 Розробка структурної схеми системи освітлення, погодження вихідних інтерфейсів вторинних перетворювачів приймачів для систем віддаленого контролю і обробки даних, аналізу та управління штучним освітленням об'єкту.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 3, 4, 5	Осінов С.Н., інженер, к.т.н.		
2, 5	Луцина Б.І., зав. лаб., к.т.н.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1.	Огляд систем штучного освітлення в фітоактивному спектральному діапазоні.		
2.	Аналіз електричних та оптичних характеристик світлодіодних джерел.		
3.	Вибір оптимальних мікроелектронних приймачів для фітоактивного джерела.		
4.	Розробка структурної схеми системи освітлення.		
5.	Аналіз результатів та оформлення пояснювальної записки.		

Студент

_____ (підпис)

І.Є. Галюк

Керівник роботи

_____ (підпис)

О.В. Борисов

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена розробці системи енергоефективного штучного освітлення рослин в умовах закритого ґрунту. В роботі проведено аналіз електричних та оптичних характеристик світлодіодних освітлювачів та мікроелектронних фотоприймачів в фітоактивному діапазоні, на основі чого обґрунтована можливість віддаленого спектрально селективного контролю і регулювання параметрів штучного освітлення. В роботі запропонована конфігурація системи штучного освітлення, що надає технічну можливість покращення фіто- та енерго-ефективного досвічування за рахунок використання спектральних складових, виключно потрібних для поточної стадії розвитку рослини. В роботі запропоновано структурну схему реалізації схеми досвічування в фітоактивному діапазоні з використанням RGB – освітлювача, сучасних мікроелектронних фотоприймачів електромагнітного випромінювання НАМАМАТСУ C9303, програмованого контролера, блоку задавання вхідних та вихідних параметрів регулювання.

Загальний обсяг роботи: 48 сторінок, 34 ілюстрацій, 1 таблиця, 13 посилань.

Ключові слова: спектр, фітоактивний діапазон, фотодіод, RGB джерело, LED, рослини, фотосинтез, досвічування.

ABSTRACT

The thesis is devoted to the development of an energy-efficient system for artificial plants lighting in closed soil. The LED sources and microelectronic photodetectors electrical and optical characteristics analysis in the phytoactive range is carried out. The possibility of remote spectrally selective control and regulation for artificial lighting parameters is substantiated. The paper proposes the artificial lighting system configuration, which provides a technical possibility to improve phyto- and energy-efficient lighting by the use of spectral components, exclusively required for the plant development at a current growing stage. The structural scheme realization for illumination in phytoactive range with use of RGB - sources, modern microelectronic photodetectors HAMAMATSU C9303, the programmable controller, the setting block and output parameters regulation is also proposed in the work.

Total amount of work: 48 pages, 34 illustrations, 1 table, 13 links.

Keyword: spectrum, phytoactive range, photodiode, RGB source, LED, plants, photosynthesis, additional lighting.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1. СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ В ФІТОАКТИВНОМУ СПЕКТРАЛЬНОМУ ДІАПАЗОНІ ЕЛЕКТРО-МАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.	
1.1. Фази розвитку рослин та фітоактивні процеси рослин	10
1.2. Спектральний контроль у сприянні біологічних процесів фотосинтезу	11
2. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПРИЙМАЧІВ В ФІТОАКТИВНОМУ ДІАПАЗОНІ.	
2.1 Світлодіодні джерела	13
2.2 Фотоприймачі у фітоактивному діапазоні	
2.2.1 Фотодіоди	20
2.2.2 Піроелектричні детектори	23
3. МІКРОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.	
3.1 Окремі аспекти систем освітлення рослин	26
3.2 Технологічні особливості світлодіодних випромінювачів	29
4. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ ТА ВТОРИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИЙМАЧІВ У СИСТЕМАХ ВІДДАЛЕНОГО КОНТРОЛЮ.	
4.1 Освітлювальні системи на димерних пристроях	33

4.2 Освітлювальні LED системи	35
5. ЗАСТОСУВАННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ, ВТОРИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИЙМАЧІВ НАМАМАTSU ДЛЯ СИСТЕМ ВІДДАЛЕНОГО КОНТРОЛЮ, ОБРОБКИ ДАНИХ, АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ ШТУЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ ОБ'ЄКТУ.	39
РЕЗУЛЬТАТИ, ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	47

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ГР – газорозрядні лампи

ЛЛ – люмінесцентні лампи

ЛР – лампи розжарювання

МГ – металогалогенні лампи

НЛВТ – натрієві лампи високого тиску

LED – світлодіодне джерело

PAR – фіто активний діапазон (Phito Active Range) фотосинтетичного випромінювання

PPFD – фотосинтетична щільність потоку фотона

RGB – (Red, Green, Blue) – триколовий (Червоний, Зелений, Синій) випромінювач або фотоприймач

ВСТУП

У переліку задач сільськогосподарської галузі ефективність технологій вирощування сільськогосподарських культур є головною. Враховуючи обмежену площу сільськогосподарських земель та у зв'язку з зростанням чисельності населення, розглядаються рішення щодо збільшення продуктивності врожаю, зокрема за рахунок застосування технології вертикального землеробства. Вирощування сільськогосподарських культур у вертикальних спорудах потребує використання штучного локального освітлення для забезпечення необхідного рівня світла для рослин [1].

Для вирощування рослин при штучному освітленні використовуються електричні джерела світла, що забезпечують стимуляцію росту рослин. Джерела штучного освітлення використовуються при повній відсутності природного світла або при його обмеженні (режим досвічування). Бажано, щоб штучне світло забезпечувало той спектр електромагнітного випромінювання, який рослини в природі отримують від Сонця, або хоча такий спектр, який задовольняв би потреби вирощуваних рослин в конкретній фазі росту та розвитку. Вуличні умови імітуються не тільки шляхом підбору кольорової температури світла і його спектральних характеристик, але і за допомогою зміни інтенсивності світла. Залежно від виду вирощуваної рослини, його стадії розвитку (проростання, ріст, цвітіння або дозрівання плодів), а також поточного фітоперіоду, рослині потрібен специфічний спектр, світлова віддача і колірна температура штучного джерела світла [2].

Визначення алгоритмів освітлення сільськогосподарських рослин, створення систем штучного освітлення, що забезпечують оптимальні умови розвитку рослин і енергетичну ефективність технологічного процесу, а також розробка електронних вузлів для синтезу подібних систем є актуальним завданням сучасності.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ В ФІТОАКТИВНОМУ СПЕКТРАЛЬНОМУ ДІАПАЗОНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.

1.1. Фази розвитку рослин та фітоактивні процеси рослин

В першій (вегетативній) фазі росту рослини потребують значну кількість синього світла, де синє світло сприяє зростанню зеленої маси на перших стадіях розвитку рослин. В другій (репродуктивній) фазі росту випромінювання має бути з червонуватим відтінком. Червоний спектр сприяє цвітінню і утворення плодів. Іноді в обох періодах застосовуються джерела світла з додаванням червоного спектра, або з додаванням синього спектра. Враховуючи стимулюючу реакцію червоного та синього світла на ріст рослин, сучасні системи освітлення зосереджуються насамперед на синьому та червоному спектрах [1].

Таким чином, фітоактивний діапазон довжин хвиль світла визначається проміжком від 480 нм до 750 нм. Дискретність фітоактивного діапазону може бути успішно використана шляхом застосування джерел світла на основі світлодіодів, що мають перевагу у порівнянні з традиційними джерелами світла для використання у фітоактивній частині спектра [2]. Привабливість світлодіодів для вирощування рослин в приміщеннях обумовлена багатьма факторами. Серед них: низька електрична потужність, відсутність баласту, низьке тепловиділення, що дозволяє встановлювати світлодіоди впритул до рослин без ризику пошкодити їх. Використання світлодіодів знижує випаровування, призводячи до подовження періодів між поливами. Світлодіодні освітлювачі забезпечують яскраве, економічне та довготривале стабільне світло, спектральним складом якого можна ефективно керувати шляхом зміни співвідношення інтенсивності джерел складових компонент червоного, зеленого та синього кольору, стимулюючи тим самим процес фотосинтезу в різних фазах росту і ефективно використовуючи енергію [2].

1.2. Спектральний контроль у сприянні біологічних процесів фотосинтезу

Встановлено, що рослини можуть селективно стимулюватися обраним спектром світла для сприяння певним біологічним процесам [2]. Спектр світла включає піки випромінювання в різних кольорових областях для сприяння різним процесам. Відповідний спектральний контроль на основі фотоприймачів має забезпечити високоефективну систему стимулювання росту рослин. Проаналізуємо систему для росту рослин, яка включає перший світлодіодний пристрій, виконаний з можливістю випромінювати світло першого кольору з контрольованим кутом променя будь-якого бажаного половинного кута та другий, виконаний з можливістю випромінювати світло другого кольору з контрольованим половинним кутом. Згідно з цим варіантом, спектр випромінювання має перший пік випромінювання при 425-475 нм і другий пік випромінювання при 635-685 нм. Спектр може також мати третій пік випромінювання при 500-600 нм. Спектр випромінювання можливо відтворювати у процентному відношенні різною кількістю червоного, зеленого, синього та далекого червоного світла [1]. Колір та спектри можуть бути обрані на замовлення, щоб забезпечити ріст рослин, характерних для потрібного виду. Це може сприяти максимальному зростанню рослин за специфічним для виду циклом росту рослин. Перевага такого варіанту здійснення, полягає в тому, що управління діаграмою спрямованості світлового променя і зміщення кольорів можуть бути досягнуті в одному і тому ж оптичному пристрої. Забезпечення управління схемою світлового випромінювання забезпечує мінімальне витрачання потужності. Кольорове поєднання допомагає забезпечити оптимальний розвиток та зростання рослин. Ще одна перевага полягає в тому, що спектром випромінювання можна динамічно керувати, щоб змінювати за часом доби чи місяцем, або змінювати відповідно до циклу росту рослин [1].

Дослідженнями реакції культур водоростей, культур ціанобактерій і рослин на різні спектри світла встановлено, що можна змінити характеристики росту цих культур і рослин за допомогою конкретних спектрів довжин хвиль.

Залежно від описаних потреб, світлодіоди конструктивно можуть поєднувати різні чіпи та люмінофори для створення світла, налаштованого на конкретні види рослин. Різні спектри можуть бути використані для зміни біохімічних процесів, таких як фотосинтез та фотоморфогенез цільової рослини. Фотоморфогенні процеси можуть включати зміни в біохімічному, фізіологічному та молекулярному складі рослини, які можуть керувати рослиною в момент розвитку [1].

Використовуючи світлодіод зі спеціалізованими спектрами та використовуючи контрольоване світло, що впливає на зміни рівня вітаміну, солі, кислоти, антиоксиданту, флавоноїду, каротиноїду, хлоропласту та додаткового пігменту в межах цільової рослини, за допомогою спектрального складу світла можливо керування зростанням рослин [1].

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПРИЙМАЧІВ В ФІТОАКТИВНОМУ ДІАПАЗОНІ

2.1.Світлодіодні джерела

Світлодіоди пропонують широкий вибір спектрів від AlGa_N (ультрафіолет - УФ), InGa_N (синій і зелений), AlInGaP (червоний), до AlGaAs (ближнього інфрачервоного - ІЧ). Також існує можливість додавати специфічні суміші фосфору до високоенергетичних синіх та ультрафіолетових світлодіодів для створення інших спектрів. Світлодіоди утворюють джерело світла для доставки специфічних спектрів рослинам, для максимального використання конкретних характеристик росту. Є можливість індивідуального вибору світлодіодного освітлення для конкретної рослини і на певній довжині хвилі, щоб забезпечити оптимальне зростання для обраних видів рослин [1].

Освітлення з різними спектрами може відображати різні піки випромінювання на різних довжинах хвиль, так ультрафіолетова область спектру нижче 400 нм, синя область спектру - між 400 і 499 нм, зелена область - між 500 і 599 нм, червона область - між 600 і 699 нм, а далека червона область зустрічається вище 700 нм [1].

Піки випромінювання на деяких довжинах хвиль можуть бути більшими, ніж піки випромінювання на інших довжинах хвиль залежно від спектру. Спектр може мати пік випромінювання у одній, або більше областях, або спектр може мати кілька піків випромінювання в одній області. Потік фотонів для областей ультрафіолетового (uv, UV), синього (b, B), зеленого (g, G), червоного (r, R) та далеко червоного (fr, FR) визначається як, $uv + b + g + r + fr = 100\%$. Для загальних застосувань $b \geq 10\%$ і $r \geq 50\%$. Для інших застосувань r може бути менше 50%, як показано на рис.1.

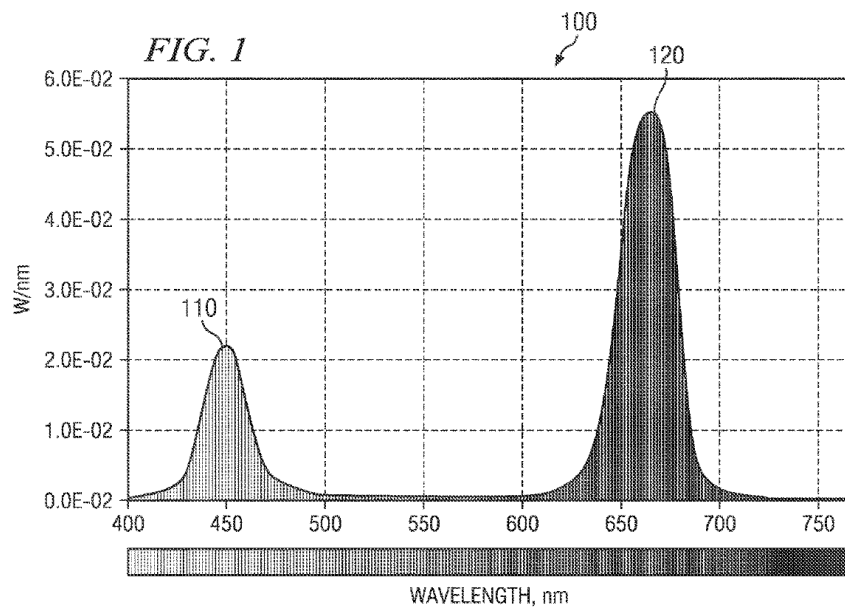


Рис. 1. - Приклад спектрального розподілу, що має пік випромінювання у синій області та пік випромінювання у червоній області [1]

На рис.1 зображений приклад спектрального розподілу, що має пік випромінювання у синій області та пік випромінювання у червоній області. Пік 110 настає при 450 нм +/- 25 нм, синя область, а пік 120 настає близько 660 нм +/- 25 нм, або червона область. Спектральний розподіл 100 може бути корисним для допомоги видам рослин протягом усього циклу росту. У цьому варіанті сильний пік випромінювання у червоній області може стимулювати фотосинтез під час вегетативного росту та полегшити стадію цвітіння. Пік випромінювання у синій області корисний для контролю висоти рослин [1].

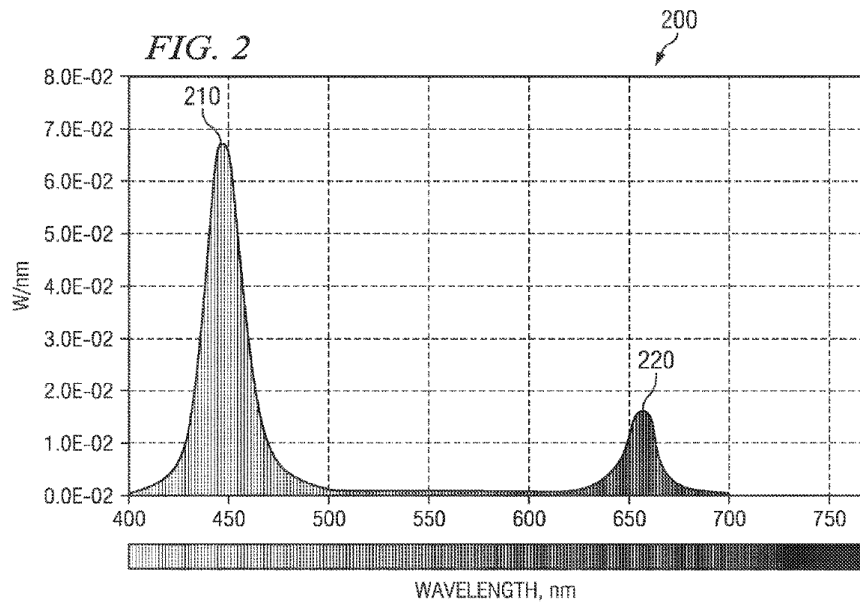


Рис. 2. - Приклад спектрального розподілу, що має пік випромінювання у синій області та пік випромінювання у червоній області [1]

На рис.2 зображений ще один приклад спектрального розподілу 200, що має два піки випромінювання, один у синій області та один у червоній області. Спектральний розподіл 200 має сильне випромінювання "синього" світла, що може бути корисним при виробництві рослин з короткими інтермодальними відстанями. Такий спектральний розподіл може бути бажаним на стадії розсади перед пересадкою. Менший пік випромінювання у червоній області може сприяти зростанню [1].

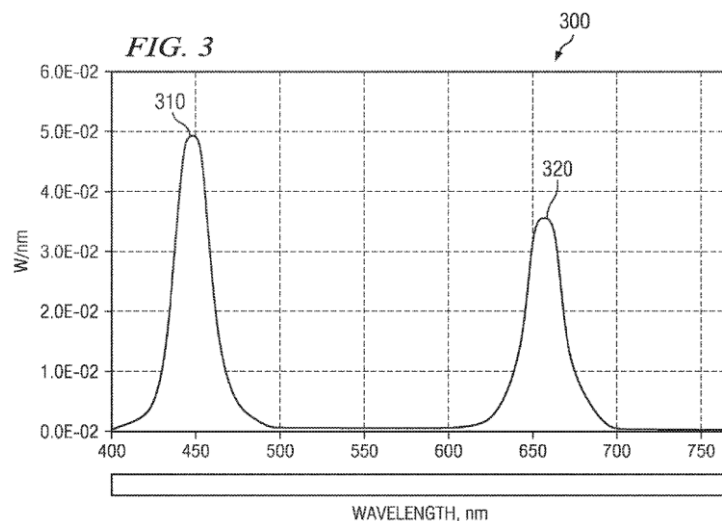


Рис. 3. - Приклад спектрального розподілу, що має пік випромінювання у синій області та пік випромінювання у червоній області [1]

На рис.3 зображений приклад спектрального розподілу 300, що має два піки випромінювання, один у червоній області та один у синій області. У цьому спектральному розподілі є інтенсивна синя область на піку 310, яка може забезпечити швидкі результати вегетативного росту. Інтенсивна синя область може зменшити висоту рослин та покращити зовнішній вигляд та використання рослин. Це корисно при виробництві листяних зелених овочів. Випромінювання в червоній області сприяють вегетативному зростанню.

Зазначимо, що приклади спектрів на рис.1– рис. 3 мають лише два чіткі піки випромінювання у зоні видимого світла, один пік у синій області та один пік у червоній області [1].

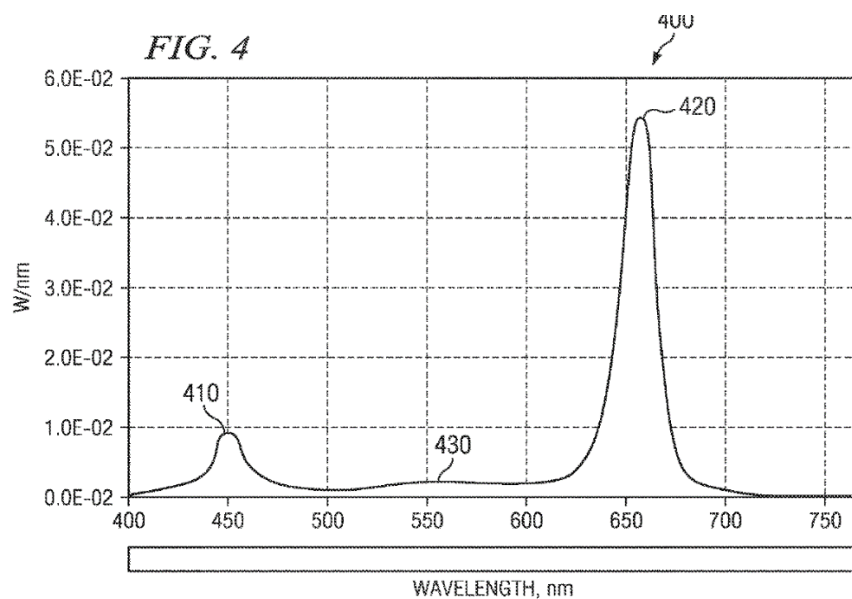


Рис. 4. - Приклад спектрального розподілу, що має три чіткі піки випромінювання у видимому спектрі [1]

На рис.4 спектральний розподіл 400 має три чіткі піки випромінювання у видимому спектрі: один у синій області, один у червоній області та один у

зеленій області. Пік 410 припадає приблизно на 450 нм +/- 25 нм, синя область, пік 420 випромінювання відбувається приблизно на 660 нм +/- 25 нм, або червона область, а пік випромінювання 430 припадає приблизно на 550 нм +/- 50 нм, зелена область. При спектральному розподілі 400 світлове випромінювання в червоній області може призвести до швидкого проростання для рослинних видів, де для проростання потрібно світло. Пік у синій області може допомогти зменшити висоту рослин. Пік зеленої області може допомогти в регулюванні аспектів фізіології рослин і допомогти пігментам, що додають, при виробництві біохімічних продуктів.

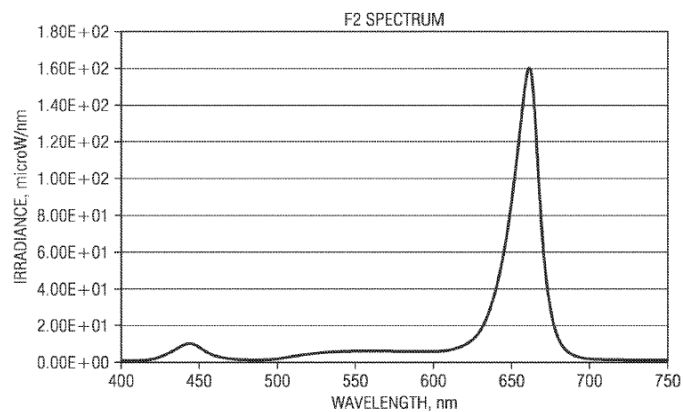


Рис. 5. - Приклад спектрального розподілу [1]

На рис.5 приклад спектрального розподілу, подібного до представленого на рис.4, але з більш високим вмістом зеленого та нижчим вмістом синього (приблизно 11% та 5% потоку фотонів, відповідно). Спектральний розподіл, що містить від 10% до 20% зеленого світла, виявився особливо хорошим для росту салату та тютюну. Спектр випромінювання на рис.5 синтезується співвідношення: 1 ряд синіх світлодіодів, покритих люмінофором, для додавання зеленого та 3 ряди світлодіодів в червоній області [1].

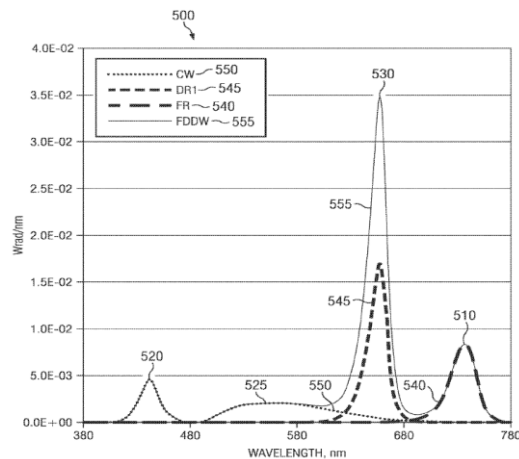


Рис. 6. - Приклад спектрального розподілу, з чотирма різними піками випромінювання у видимому спектрі [1]

На рис.6 зображений ще один приклад спектрального розподілу 500 з чотирма різними піками випромінювання у видимому спектрі: пік 520 у синій області; пік 525 в зеленій області; пік 530 в червоній області і пік 510 в крайній червоній області. Спектр досягнутий шляхом змішування світла що має піки випромінювання в різних областях. В якості прикладу, спектр на рис.6 можна досягти, використовуючи співвідношення 1 світлодіодного випромінювання з піковою довжиною хвилі випромінювання в далекій червоній області (наприклад, 730 нм +/- 25 нм) (представлене лінією 540); два світлодіоди, що мають піки випромінювання у червоній області (наприклад, 660 нм +/- 25 нм) (представлені рядком 545); один світлодіод, що випромінює прохолодне біле світло, що має піки випромінювання у синій області (наприклад, 450 нм +/- 25 нм) та зеленій області (560 нм +/- 25 нм) (представлений рядком 550) для створення загального спектру випромінювання, представленого лінією 555.

У деяких випадках може бути бажаним доповнити існуючі спектри додатковим світлом на певних довжинах хвиль, вибраних для стимулювання певних біологічних процесів. На рис.7 та рис.8 зображають приклади варіантів додаткового спектру випромінювання з піком одиничного випромінювання [1].

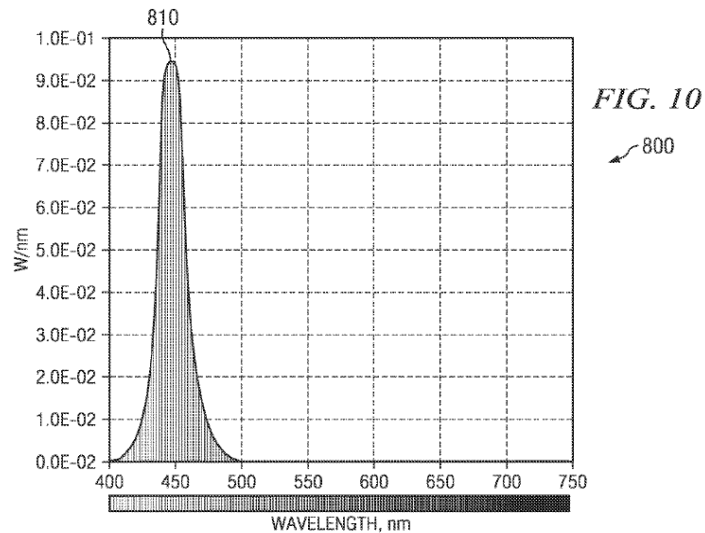


Рис. 7. - Приклад спектрального розподілу, де зображений варіант здійснення додаткового спектру випромінювання [1]

На рис.7 додатковий спектр випромінювання 800 може мати один пік випромінювання 810 при 450 нм +/- 25 нм. Один пік випромінювання 810 у синій області може спричинити регулювання біологічними компонентами рослини, такими як криптохроми та фототрофіни, опосередковуючи різні реакції рослин, такі як фототропна кривизна, гальмування зростання подовження, рух хлоропластів, відкриття устінки та регулювання росту насіння. Це світло може безпосередньо поглинатися хлорофілом при фотосинтезі. Це може бути корисно для розсади та молодих рослин під час вегетаційної стадії циклу їх зростання, особливо коли «розтягування» рослин потрібно зменшити, або усунути. Розтягування рослин, відбувається, коли рослина збільшується непропорційно у висоту порівняно з рослинами подібної ваги з того ж сорту, вирощеного на відкритому повітрі.

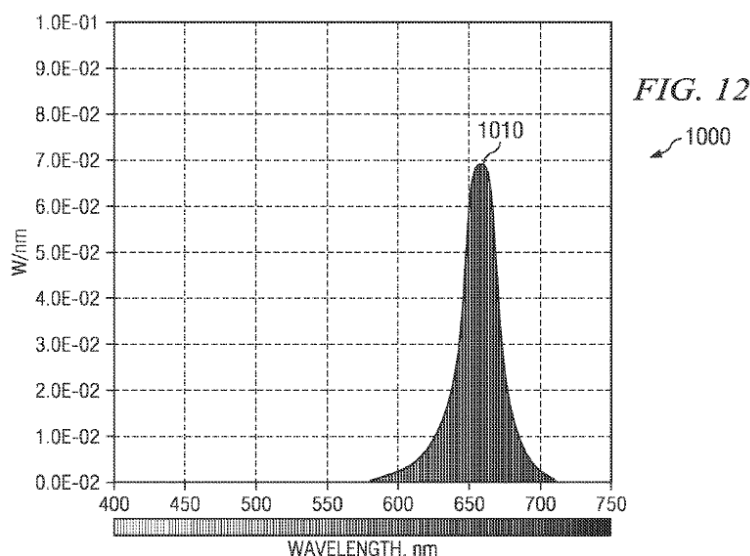


Рис. 8. - Приклад спектрального розподілу, де зображений варіант здійснення додаткового спектру випромінювання [1]

На рис.8 зображений варіант здійснення додаткового спектру випромінювання 1000. У цьому прикладі одинарний пік випромінювання 1010 може виникати при близько 660 нм +/- 25 нм в межах червоної області. Спектр 1000 може мати сильну фотосинтетичну дію і також може проявляти високу дію на регульоване проростання, цвітіння та інші процеси, регульовані фітохромом червоного кольору. Додаткові спектри 1000 можуть бути ефективними для продовження світлового циклу, або перерви в нічний час, щоб викликати цвітіння рослин довгого дня, або запобігти цвітінню рослин короткого дня. Загалом, рослинам із довгими днями може знадобитися менше певної години темряви протягом кожного 24-годинного періоду, щоб викликати цвітіння [1].

2.2 Фотоприймачі у фітоактивному діапазоні

2.2.1 Фотодіоди.

Фотодіоди на основі кремнію застосовуються в якості первинного перетворювача для вимірювання параметрів світлового середовища. З огляду на

вимоги нормативної документації щодо фото- та радіометрії видимого діапазону спектру, на фотодіоди, які б могли бути використані для цієї мети можна сформулювати наступні вимоги [11]:

1. Загальний спектральний діапазон вимірювань не вужче 380 - 780 нм.
2. Довжина хвилі максимуму спектральної характеристики 750 – 850 нм.
3. Інтегральна чутливість не менше 6 мА/лм, або 0,03 мкА/лк.
4. Динамічний діапазон (діапазон, в якому нелінійність енергетичної характеристики (залежність фотоструму від потужності падаючого випромінювання) не менше 6 – 7 порядків).
5. Нелінійність енергетичної характеристики у динамічному діапазоні не більше 1 %.
6. Діапазон вимірювання освітленості 10^{-1} – $2 \cdot 10^5$ лк.
7. Струмова монохроматична чутливість на довжині хвилі $\lambda = 0,3$ мкм не більше 0,06 А/Вт.
8. Темновий струм при температурі 20 °С при подачі напруги зміщення 1 В не більше 0,05 мкА. При напрузі зміщення 10 мВ – не більше 1 нА.

З літературних джерел відомо використання фотодіодів кремнію та оптичних фільтрів зі скла для створення рівномірної чутливості фотоприймача в спектральному діапазоні між 400 нм та 700 нм. Оптичний фільтр адаптує спектральну відповідь, крім того, на фільтр не впливають фактори навколишнього середовища, такі як тепло або вологість. Фільтр блокує світло з довжиною хвилі понад 700 нм, що є критичним для вимірювань під рослинністю, де співвідношення інфрачервоного та видимого світла може бути високим.

Характеристики подібного фотоприймача та його зовнішній вигляд наведено на рис.9 та рис.10.

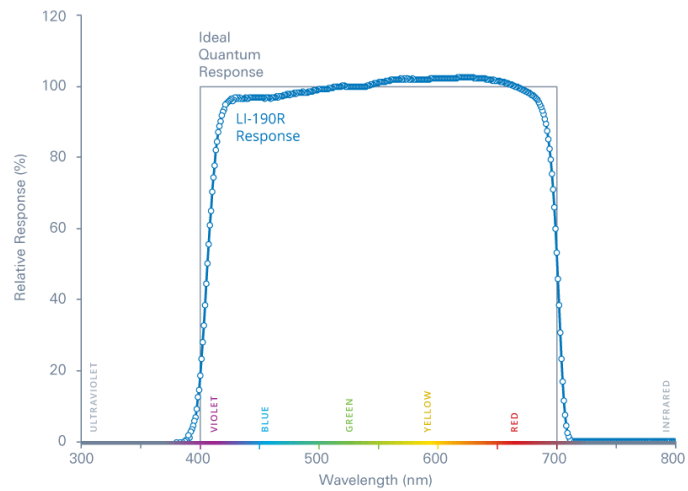


Рис. 9.1 - Нормалізована відповідь у фотонних одиницях LI-190R [5]

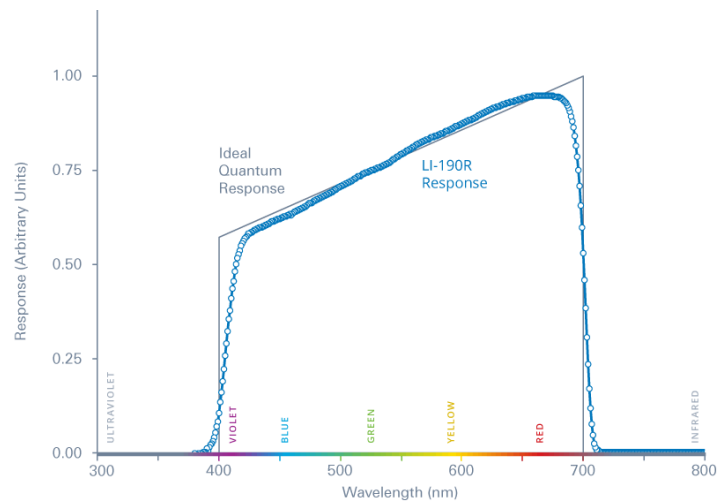


Рис. 9.2 - Відповідь в енергетичних одиницях LI-190R [5]



Рис. 10 - Зовнішній вигляд датчика LI-190R [5]

Технічні характеристики LI-190R.

Чутливість: зазвичай від 5 мкА до 10 мкА на 1000 мкмоль /с / м2

Лінійність: максимальне відхилення від 1% до 10000 мкмоль /с / м²

Залежність температури: $\pm 0,15\%$ за $^{\circ}\text{C}$ максимум

Корекція косину: косинус виправлено до кута падіння до 82°

Діапазон робочих температур: від -40°C до 65°C

Діапазон відносної вологості: від 0% до 100% RH, без конденсації

Фотоприймачі типу LI-COR стійкі до погодних умов, прості в обслуговуванні та коригують косинус (падіння світла при похилих кутах). Конструкція датчика має великий стік для виливання води атмосферних опадів, що запобігає потраплянню води на чутливу поверхню фотоприймача, збільшуючи термін експлуатації датчиків та зменшуючи дрейф вимірювання[5].

2.2.2. Піроелектричні детектори

Теплові детектори поліхроматичні з дуже широкою спектральною пропускною здатністю [8].

Піроелектричний ефект є у багатьох матеріалах. Найчастіше використовуються матеріали:

- DLA – дейтерований тригліциновий сульфат легований L-аланіном
- LTO - танталат літію
- PZT - титанат цирконату свинцю.

Вихідний сигнал такого сенсора - це зміна заряду, який присутній на поверхні активних елементів, що обумовлено градієнтом температури dT / dt , оскільки змінюється його температура. Оскільки залежність між струмом і зарядом впливає на зміну температури (dt).

На АЧХ піроелектричного детектора мають вплив наступні фактори:

1. Теплові властивості піроелектричного кристалу
 - а. Теплопровідність кристалів та схема кріплення
 - б. Теплова маса поглинач

2. Частотна характеристика попереднього підсилювача
 - а. Значення зворотного зв'язку резистору в поточному режимі
 - б. Значення навантажувального резистора в режимі напруги
3. Шум Джонсона в навантаженні, або резистор зворотного зв'язку
4. Поточний шум від входу-витік інтегрованого JFET, або операційного підсилювача (OP AMP).
5. Шум напруги JFET, або OP AMP
6. Діелектричні дотичні втрати.

Багатоканальні піроелектричні детектори Серія L1X / 2X

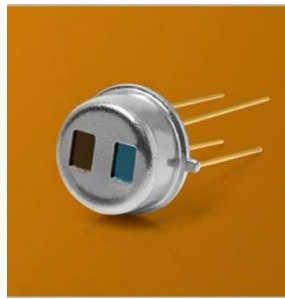


Рис.11 - Багатоканальні піроелектричні детектори [6]

Піроелектричні детектори L1X / 2X - це сукупність багатоканальних пристроїв LiTaO_3 , що працюють в поточному режимі з вбудованим операційним підсилювачем.



Рис.12 - Ізометричний малюнок L1200X1810(з вирізом) [6]

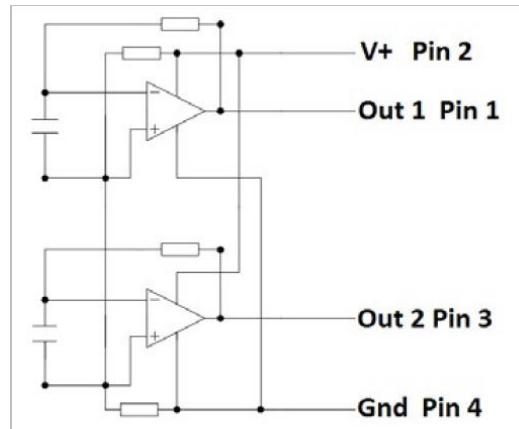


Рис.13 - Принципова схема фотоприймача L1200X1810 [6]

Конфігурація піроелектричного детектора, залежно від застосування, містить фільтр. Характеристики таких приймачів наведено на наступних рисунках. Використання датчиків у якості ланцюга зворотного зв'язку надає можливість створення замкнутої системи керування.

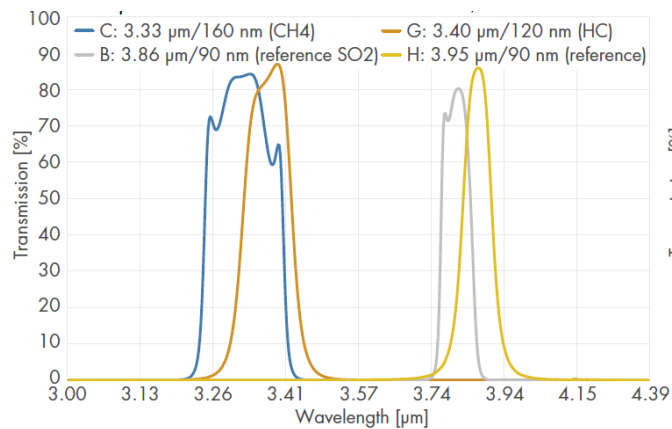


Рис.14 - Смугові фільтри [8]

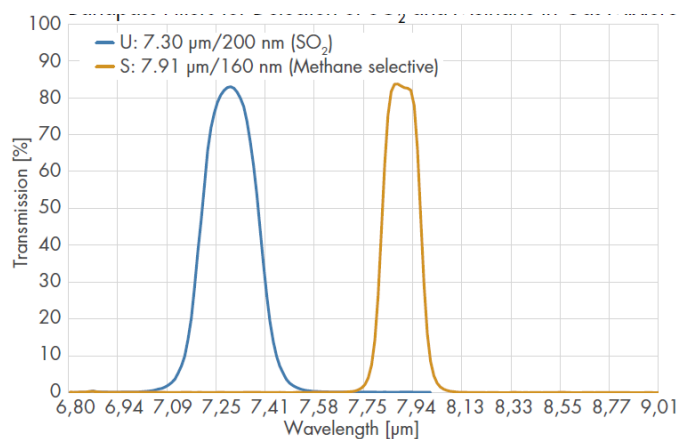


Рис.15 - Смугові фільтри [8]

РОЗДІЛ 3. МІКРОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.

3.1. Окремі аспекти систем освітлення рослин

Спектр динамічно змінюється з часом під час циклу росту рослин. Переважно, існує один пік випромінювання на одну область.

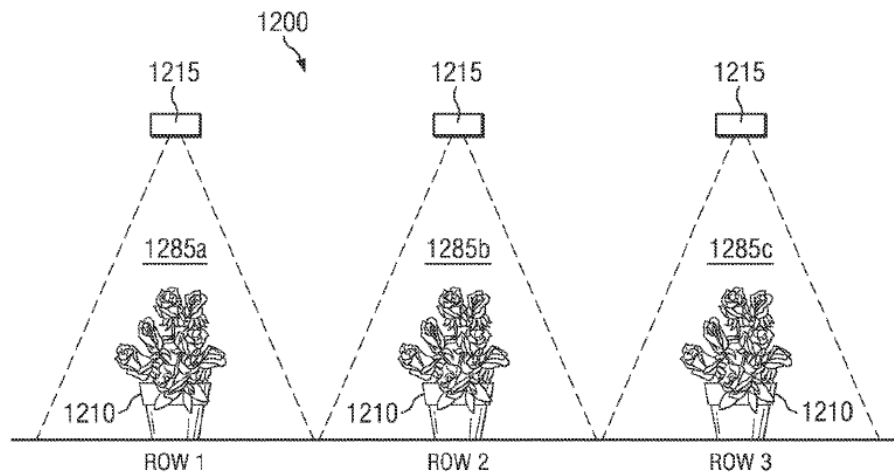


Рис. 16. - Схематичне зображення варіанту здійснення системи, в якій паралельні світлові смуги розташовані так, щоб забезпечувати світло рослинам[1]

На рис.16 - схема системи, в якій паралельні світлові смуги 1215 розташовані так, щоб забезпечувати світло рослинам 1210. У варіанті здійснення, рис.16, кожна світлова смуга 1215 містить панель світлодіодів. Шаблон освітлення на етапі розвитку рослини є результатом змішаного світла кожного кольорового каналу [1].

Розташування згідно рис.16 є корисним у вертикальних системах рослинництва, де для росту рослин обмежений простір. Додаткова економія місця може бути реалізована, якщо контрольовані світлові ділянки 1285a, 1285b та 1285c мають однаковий кольоровий профіль, оскільки від перекриття

підсвічування паралельних світлових смуг 1215 буде мало, або зовсім немає ефекту.

Визначена система забезпечує вигідну фотосинтетичну щільність потоку фотонів. Тобто, використання меншої кількості світлих смуг для оптимального освітлення однакової кількості рослин шляхом доставки бажаної кількості фотонів для рослин, забезпечує економію за доставлений фотон для освітлених рослин [1]. Фітоактивний діапазон випромінювання PAR - це спектральний діапазон, який фотосинтетичні організми здатні використовувати в процесі фотосинтезу. Цей спектральний діапазон відповідає діапазону видимого світла (400 нм до 700 нм).

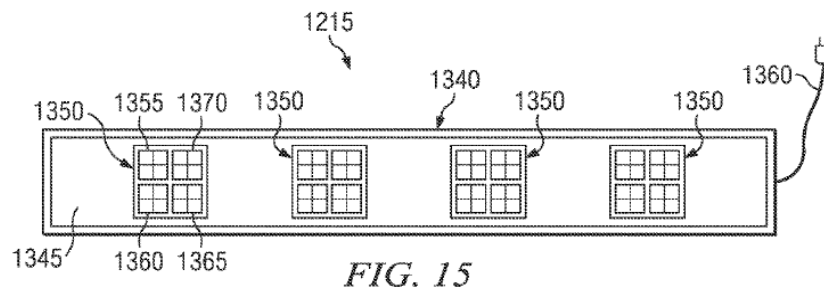


Рис.17. - Схематичне зображення панелі, в якій розміщений набір світлодіодів[1]

Панель світлодіодів на рис.17, містить рамку 1340, що визначає зону утримування джерела світла 1345, в якій розміщений набір світлодіодів 1350. Світлова смуга 1215 включає необхідні з'єднання для живлення та передачі даних. Як варіант, кожна матриця 1350 включає шістнадцять оптичних пристроїв, кожен з яких включає світлодіод із відповідним первинним оптичним пристроєм. Світлодіоди, люмінофори та інші компоненти можуть бути обрані для створення потрібного спектру. Таким чином, спектр на рис.1 може бути досягнуто за допомогою 4 синіх світлодіодів та 12 червоних світлодіодів, спектр на рис.2 можна досягти за допомогою 12 синіх світлодіодів та 4 червоних світлодіодів, спектр на рис.3 може бути досягнуто за допомогою

8 синіх світлодіодів та 8 червоних світлодіодів. Спектр на рис.4 може бути досягнуто за допомогою 4 синіх світлодіодів та 12 червоних світлодіодів разом із люмінофором, таким як ітрієво-алюмінієвий гранат, легований певними домішками для отримання 8-10% зеленого світла [1].

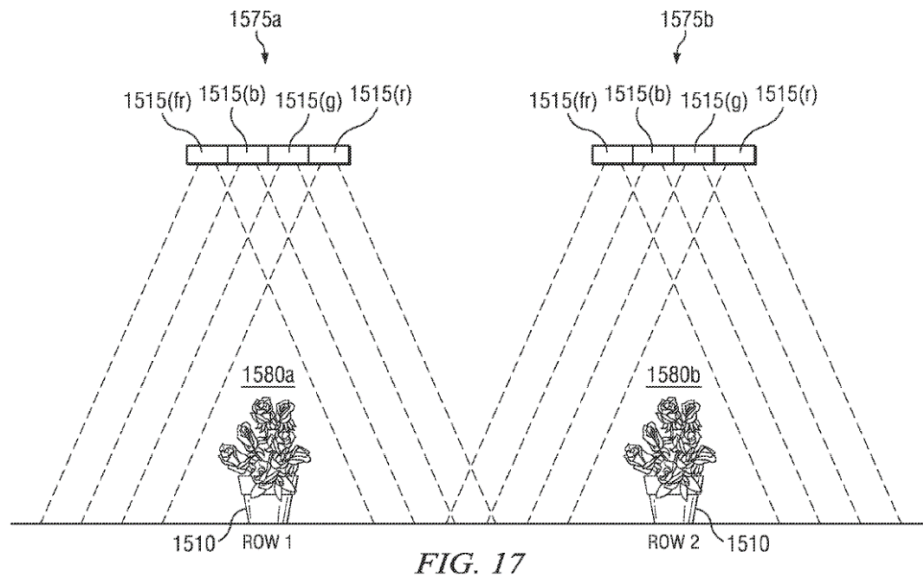


Рис. 18. - Схематичний варіант здійснення системи освітлення рослин [1]

Інший варіант здійснення системи освітлення рослин наведено на рис.18. У наведеному прикладі одна матриця може бути використаною для створення потрібного спектру світла. За рахунок керування панеллю з матрицями, світло з декількох матриць змішується для досягнення бажаного спектру. Також, контрольована область світла 1580 може випромінювати індивідуальний спектр, потрібний для регульованого росту рослин.

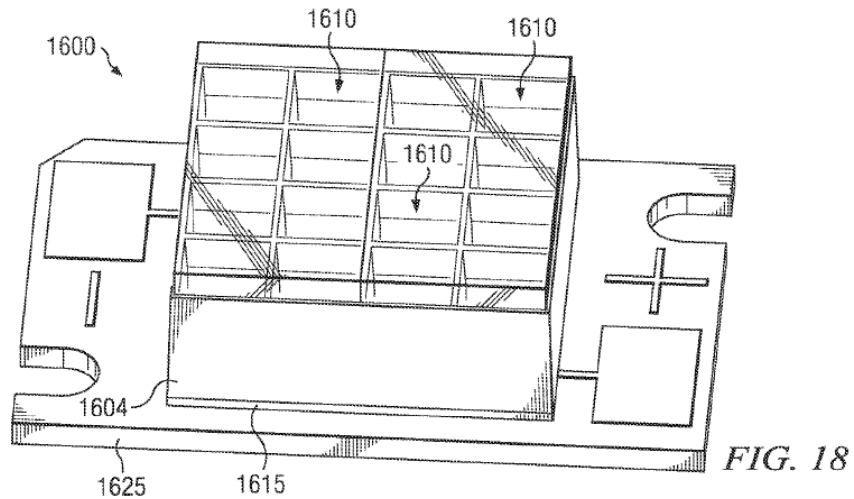


Рис. 19. - Схематичне зображення матриці з керуванням кутів променю і висоти рівномірності світловіддачі [1]

Керування кутами променів і рівномірністю світловіддачі здійснюється шляхом механічної підтримки положення та відповідного електричного з'єднання світлодіодів (рис.19).

3.2. Технологічні особливості світлодіодних випромінювачів

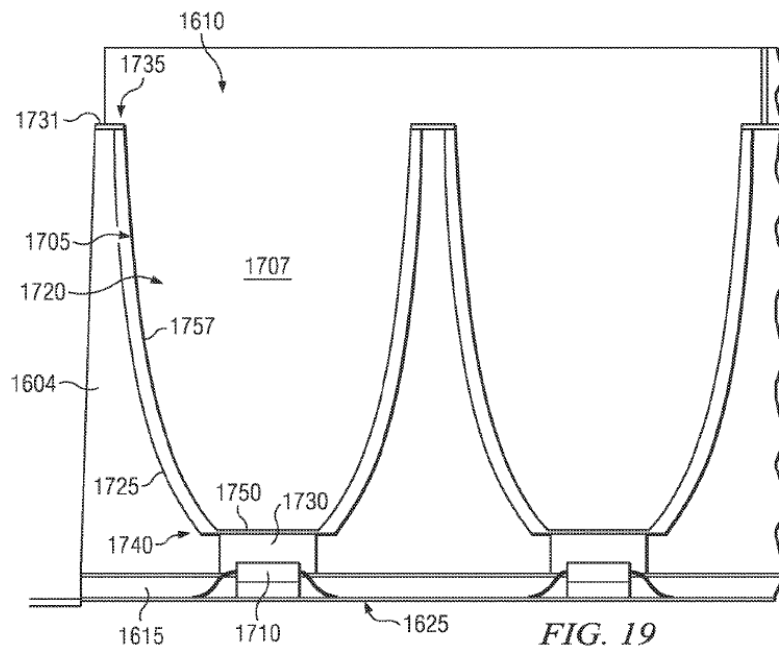


Рис. 20. - Схематичне зображення перерізу матриці [1]

Схема матриці відповідно до рис.20, має корпус 1604, об'єktiv 1705, ділянка 1610, світлодіод 1710, світлодіодна порожнина 1730, шар корпусу 1615. Ділянка 1610 інтегрована з об'єktivом 1705 таким чином, що вони утворюють єдиний вузол об'єктива. Ділянка 1610 може бути інтегрована з іншими лінзами 1705, так що один вузол об'єктива буде мати з'єднувальну частину та кілька ділянок об'єктива. У варіантному здійсненні лінза 1705 виконана за формою 1757 для випромінювання світла в бажаному куті променю. Порожнина світлодіоду 1730 показана з вертикальними боковими стінками, світлодіодна порожнина 1730 може мати конічні, вигнуті або інші форми боковин, щоб діяти як лінза перенаправлення світла [1].

Фосфорний шар розташовують поблизу поверхні входу 1750 і світла, що виходить з світлодіодної порожнини 1730, та потрапляє на люмінофорний шар. Шар люмінофора перетворює світло, і світло направляється через лінзу 1705.

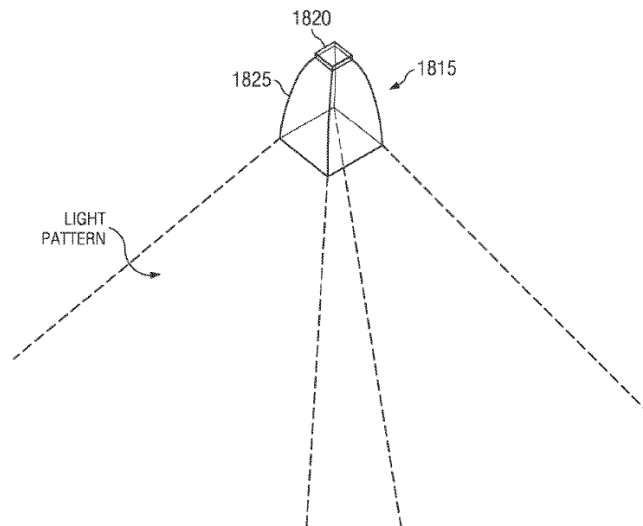


Рис. 21. - Оптичний пристрій з контрольованим кутом променю [1]

Ілюстрація цього процесу на рис.21, причому оптичний пристрій може містити комбіновані оптичні пристрої з різним місцем розміщення люмінофору.

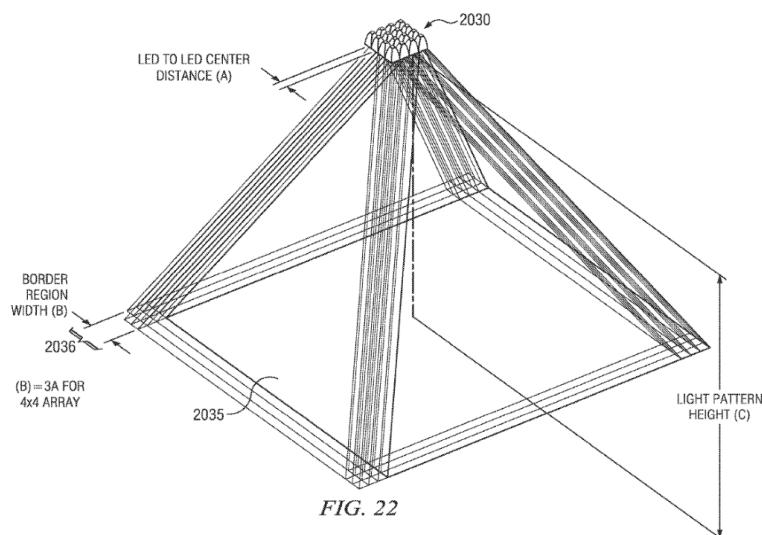


Рис. 22. – Схема для використання у рослинництві [1]

Зі збільшенням відстані між освітленою поверхнею та масивом 2030 освітлена площа зростає, тоді як ширина прикордонної області 2036 залишається однаковою, рис.22. Кілька масивів можуть бути влаштовані таким чином, що прикордонні ділянки перекриваються для створення більшої рівномірності прикордонних областей, що призводить до того, що більша освітлена область має рівномірний профіль. Завдяки квадратній, або прямокутній формі освітленої області, створеної масивом 2030, кілька масивів можуть бути розташовані на потрібних відстанях, щоб забезпечити цільове рівномірне освітлення на великих площах [1].

Колір області перекриття 2035 може залежати від кольору, випромінюваного кожною лінзою, який, у свою чергу, може залежати від обраного світлодіоду та люмінофору. Перевагою використання масиву одиниць є можливість надавати "гібридні" рішення з вузькими кутами променя, в яких одні лінзи покриті люмінофором, а інші - ні.

Люмінофори можна вибирати та керувати світлодіодами так, що комбінований вихід у зоні перекриття 2035 матиме бажаний спектральний розподіл потужності та кольорові координати для досягнення бажаних значень

х та у на діаграмі хроматичності. Використовуючи одиниці, що випромінюють різні кольори (з додаванням фосфору, або без нього), можна досягти динамічного керування кольором світла (за допомогою RGB-підходу), або динамічного білого світла, що змінюється від теплого на нейтральне до холодного (і назад, якщо необхідно) протягом дня [1].

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ ТА ВТОРИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИЙМАЧІВ У СИСТЕМАХ ВІДДАЛЕНОГО КОНТРОЛЮ.

4.1. Освітлювальні системи на диммерних пристроях

На початку дев'яностих років почалися перші випробування на штучне освітлення. Відповідні установки містять ГЛ та були обладнані електромагнітними баластами, які розміщуються між електромережею та лампами для забезпечення належної роботи ламп. Ці баласты потребували великих конденсаторів для компенсації гармонік [3].

Досить швидко було розроблено електронний баласт, що дає ряд переваг щодо електромагнітного варіанту, але витрати на енергію дедалі більше визначають собівартість. Задоволення цієї потреби та забезпечення, надійного та ефективного режиму освітлювальної установки досягається за рахунок диммерних пристроїв. Диммерні пристрої забезпечені засобами управління і автоматично змінюють інтенсивність джерел світла. Джерела світла поділяються на декілька груп, потужність кожної групи змінюється відповідно до заздалегідь визначеної схеми, тоді як структури різних груп фазово-зміщені один до одного, таким чином, що електрична потужність, споживана спільними групами, змінюється менше, ніж сума коливань потужності окремих груп. Електроенергія, споживана спільними групами, змінюється в найменшій мірі [3].

В якості прикладу, на рис.23 показана блок-схема освітлювальної установки. Установка містить ряд ламп 2 а, 2 б. . . 2 п, які збуджуються пов'язаними електронними баластами 3 а, 3 б,. . . 3 п. Установка працює від мережі змінного струму. Електронні баласты 3 а, 3 б,. . . 3 п розроблені як диммерні баласты. З цією метою передбачені диммерні пристрої, позначені символами 4 а, 4 б,. . . 4 п, які можуть керувати баластами таким чином, що

лампи, підключені до баластів, можна встановлювати на бажаному рівні освітлення.

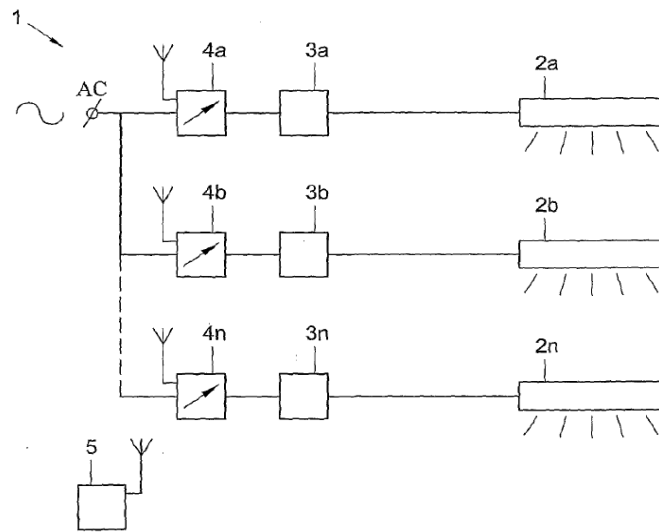


Рис. 23. - Блок-схема приладу освітлювальної установки для теплиці [3]

Бажаний рівень світла можна встановити за заданої напруги мережі між максимальним і мінімальним рівнем освітлення, що визначається лампами та баластами. На рис.24 схематично представлено можливі періодичні зміни інтенсивності освітлення.

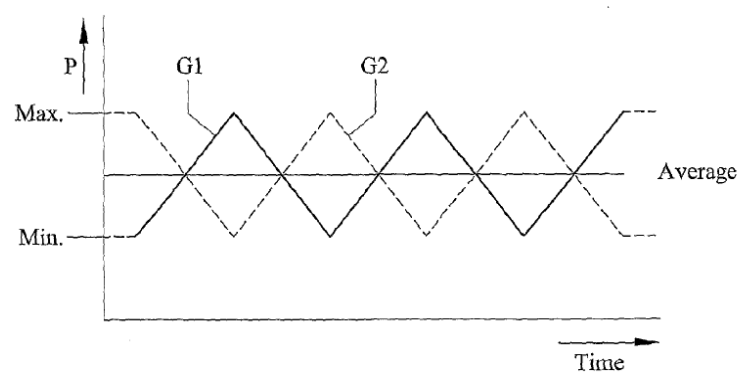


Рис. 24. – Схема освітлення з періодичною зміною інтенсивності в часі [3]

На рис.24 наведено дві схеми освітлення, які однакові, але зміщені на півперіод у часі, для двох груп світильників. Таким чином, загальна потужність

P, споживана електроосвітлювальною установкою, може бути постійною, незважаючи на періодичні зміни інтенсивності освітлення. Загальна споживана електрична потужність освітлювальної установки не є постійною, але коливання споживаної електроенергії менше, ніж у випадку з однією групою ламп. Відповідно до використання більшої кількості груп загальна споживана потужність ближче до постійної величини. Послідовність освітлення емпірично визначається для кожної культури. Різні групи світильників можуть бути розташовані в різних місцях, але також можуть бути розміщені таким чином, що різні групи ламп освітлюють одну і ту ж площу. Застосування диммерних систем дає економію споживання електричної енергії на освітлення врожаю щонайменше 15% [3].

4.2. Освітлювальні LED системи

При використанні LED в даний час стає можливим формування освітлення будь-якого спектра від 300 нм до 800 нм більш ефективно, ніж при використанні більшості традиційних джерел, крім того, можна регулювати спектральний склад джерела світла. Виробники освітлювальних пристроїв створюють пристрої, що розрізняються характеристиками, як в спектрі сформованого випромінювання, так і в інтенсивності. Фактично LED освітлення забезпечує можливість регулювати спектральний склад в залежності від часу. Не тільки інтенсивність освітлення становить інтерес в цьому випадку, але особливо цікавим є реалізація потреби в регулювання спектрального складу світла [4].

Бажана фізіологічна відповідь рослини відповідно алгоритмізується та задається в вигляді точки в багатовимірному просторі рослинницьких впливів, згаданий багатовимірний простір рослинницьких впливів містить щонайменше два виміри (рис.25). Перший вимір - бажаний вплив на фотосинтез, другий - бажаний вплив на фототропін. Процесор з'єднано при функціонуванні системи

з запам'ятовуючим пристроєм, що містить в пам'яті опис оптимального підпростору багатовимірному простору рослинницьких впливів. Його представляють точки багатовимірному простору рослинницьких впливів, що підлягають перетворенню в керуючі інструкції, здійсненні процесором по відношенню до RGB-джерел опромінення для згаданої щонайменше однієї системи освітлення.

Простір рослинницьких впливів можна використовувати для багатьох цілей:

1. Для прогнозування відповіді рослин на світло і опису світлових рецептів для різних сільськогосподарських культур.
2. Для забезпечення можливості описувати спектральний склад актуального світла.
3. Додаткове застосування простору рослинницьких впливів можна знайти в області динамічного регулювання спектра освітлення для росту рослин.
4. Світлочутливі фотоприймачі вимірюють спектр і можуть використовувати координати для того, щоб описати спектральний склад штучно генерованого світла відповідно до природного світла.

У таких тепличних системах мають бути передбачені рецепти вирощування, що дозволяють рослинникам вибрати сільськогосподарську культуру і згідно до вибору, відповідно до рецепту вирощування, в системи управління кліматом програмуються директиви управління освітлювальною мережею, що залежать від часу і налаштування для системи відповідно до технології, стадії росту і культури [4].

Освітлювальні пристрої можуть мати різні механізми для регулювання вихідного оптичного випромінювання. У простому випадку, як у випадку деяких заснованих на LED освітлювальних пристроїв, LED можна тільки включити або виключити. Таким чином, в таких освітлювальних приладах,

вимикаючи і вимикаючи більшу, або меншу кількість LED, можна поступово регулювати інтенсивність. Забезпечення правильної інтенсивності і спектрального складу світла на рівні рослин кліматичного комп'ютеру повинна бути доступна докладна інформація про встановлені освітлювальні прилади, а також про їх розташування в теплиці [4]. Крім того, результати, отримані в дослідних інститутах, повідомляють оптимальні умови освітленості, необхідно перевести в параметри, які можливо поставити на доступну систему освітлення.

Розробка простору рослинницьких впливів дозволяє регулюванню стати менш залежним від технічної конструкції освітлювальних пристроїв та інших компонентів. Інша перевага полягає в тому, що після задання простору рослинницьких впливів необхідно обчислювати і досягати тільки правильних координат. Вибір шляху досягнення може залежати від енергетичної ефективності, або від економічної ефективності.

Система управління має регулювати спектр світла освітлювальних пристроїв, передаючи правильні координати в просторі рослинницьких впливів, не вимагаючи інформації про точні спектри встановлених джерел. Світлочутливі датчики можуть вимірювати підсумковий спектр і повідомляти результат в формі координат в просторі рослинницьких впливів.

Світловий рецепт при цьому не обов'язково вбудовувати в освітлювальний пристрій, а можна продавати кінцевому користувачеві у вигляді додаткового програмного забезпечення до програмного забезпечення управління кліматом. В якості альтернативи, світлові рецепти можуть міститися у віддаленій базі даних, доступ до якої може здійснюватися, за допомогою інтерфейсу [4].

Встановлено, що використання двох вимірів вже дозволяє описувати умови освітленості. У варіанті здійснення координати в просторі рослинницьких впливів характеризують щонайменше інтенсивність впливу на фотосинтез і інтенсивність впливу на фототропін. Спосіб обчислення таких

інтенсивностей полягає у врахуванні всіх вкладів всіх релевантних довжин хвиль світла в безпосередній вплив, взятих з відповідними ваговими коефіцієнтами. При цьому, правильні ваги залежать від інтенсивності світла розглянутих довжин хвиль. Спосіб обчислення інтенсивності впливу полягає у визначенні для кожної релевантної довжини хвилі відносної інтенсивності впливу і в підсумовуванні цих відносних інтенсивностей для всіх релевантних довжин хвиль [4].



Рис. 25. - Основні рослинні спектри дій для обчислення простору рослинницьких впливів [4]

РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ, ВТОРИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИЙМАЧІВ НАМАМАTSU ДЛЯ СИСТЕМ ВІДДАЛЕНОГО КОНТРОЛЮ, ОБРОБКИ ДАНИХ, АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ ШТУЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ ОБ'ЄКТУ.

При правильному підборі світлового спектру, LED модулі на 85 - 100% ефективніші для процесу фотосинтезу ніж існуючі джерела фотосинтезного випромінювання. Більш економічні та мають значно більший термін безперервної роботи. У таблиці 1 та на рис.26 представлені відмінності про різні джерела для досвічування рослин [9].

Таблиця 1. – Відмінності різних джерел для досвічування рослин [9]

Фактор	Повно спектральні світлодіоди	Натрієві лампи	Метал гідридні лампи	Керамічні метал гідридні лампи	Компактні флуоресцентні лампи
Ціна	висока	середня	середня	висока	низька
Виділення тепла	низьке	високе	високе	високе	низьке
Повний спектр	так	ні	ні	так	ні
Розмір лампи	малий	великий	великий	великий	малий
Час роботи	50,000	15,000	15,000	20,000	10,000

Цілорічне вирощування сільськогосподарських культур можливо лише в умовах захищеного ґрунту при додатковому штучному опроміненні та опаленні тепличних комплексів. Виходячи з цього, для ефективного вирощування рослин в умовах захищеного ґрунту при додатковому штучному опроміненні необхідно застосовувати адаптивні випромінювальні установки, які можуть змінювати не

тільки інтенсивність, але й спектральний склад випромінювання, підтримуючи при цьому заданий рівень сумарного опромінювання в залежності від типу рослин, фази їх розвитку та часу доби. Головним процесом життєдіяльності рослин, відповідальним за їх розвиток є фотосинтез. Понад 95% сухої речовини рослин створюється в результаті цього процесу. Інтенсивність фотосинтезу має два максимуми відповідно двом максимумам поглинання хлорофілу, як показано на рис. 27 [10].

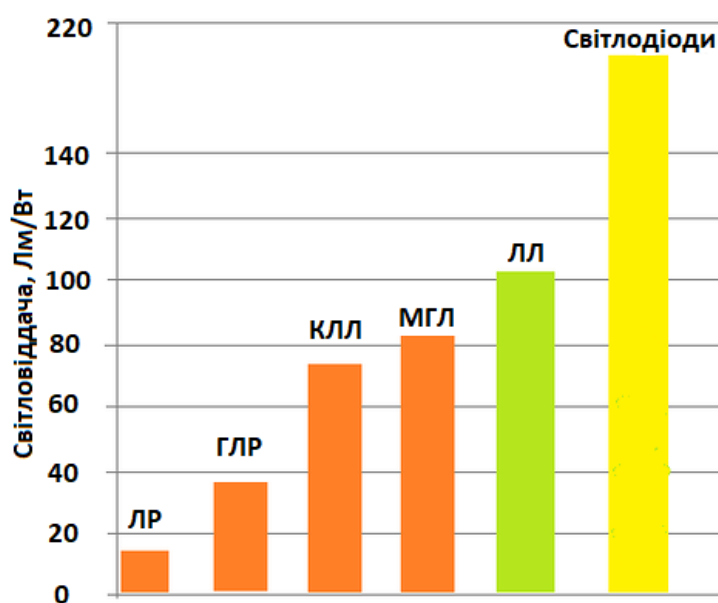


Рис. 26. - Світловідача різних видів ламп: ЛР – лампи розжарювання; ГЛР – галогенні лампи; КЛЛ – компактні люмінесцентні лампи; МГЛ – металогалогенні лампи; ЛЛ – люмінесцентні лампи; Світлодіоди – світлодіодні лампи [9]

Цілорічне вирощування сільськогосподарських культур можливо лише в умовах захищеного ґрунту при додатковому штучному опроміненні та опаленні тепличних комплексів. Виходячи з цього, для ефективного вирощування рослин в умовах захищеного ґрунту при додатковому штучному опроміненні необхідно застосовувати адаптивні випромінювальні установки, які можуть змінювати не тільки інтенсивність, але й спектральний склад випромінювання, підтримуючи при цьому заданий рівень сумарного опромінювання в залежності від типу

рослин, фази їх розвитку та часу доби. Головним процесом життєдіяльності рослин, відповідальним за їх розвиток є фотосинтез. Понад 95% сухої речовини рослин створюється в результаті цього процесу. Інтенсивність фотосинтезу має два максимуми відповідно двом максимумам поглинання хлорофілу, як показано на рис. 27 [10].

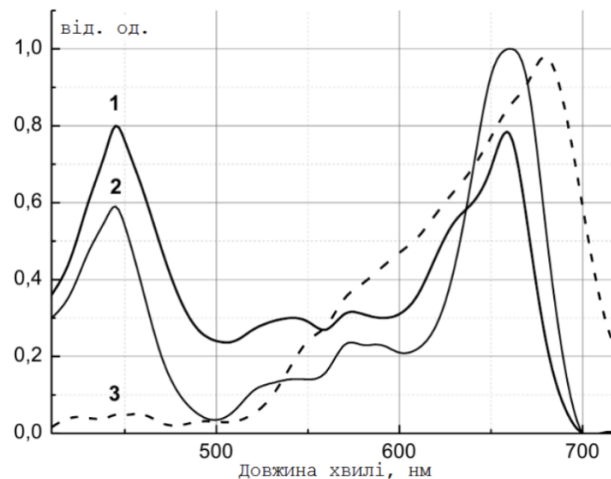


Рис. 27 – Активність процесів: 1 – синтез хлорофілу; 2 – фотосинтез;
3 – фотоморфогенез [10]

Спектр випромінювання натрієвих ламп як джерел додаткового освітлення зображено на рис.28. Через низький рівень «синього» і «червоного» діапазонів в спектрі випромінювання цих ламп, їх фотосинтетична ефективність відносно невелика [10].

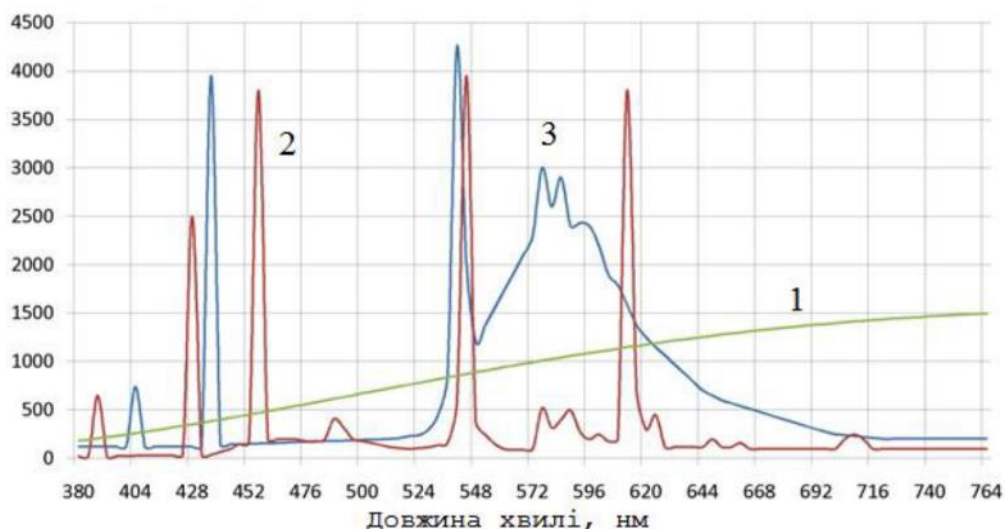


Рис. 28 - Спектр випромінювання: 1 - лампи розжарювання; 2 - енергозберігаючої лампи «теплого білого» світла; 3 - енергозберігаючої лампи «холодного білого» світла [10]

На рис. 29 приведенні типові спектри випромінювання білих світлодіодів з різним спектральним складом в залежності від складу люмінофору.

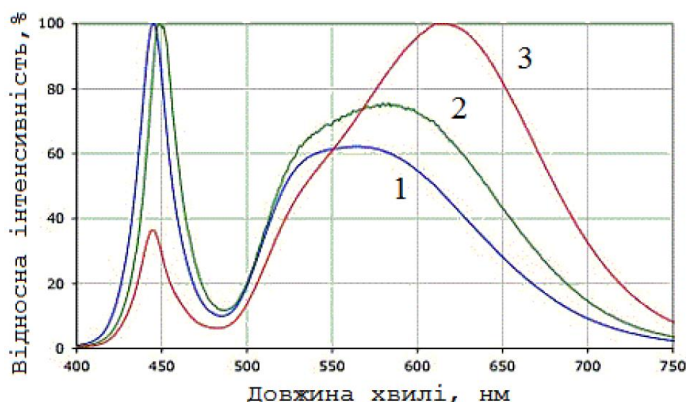


Рис. 29 – Спектр випромінювання білого світлодіоду: 1 – холодний білий; 2 – нейтральний білий; 3 – теплий білий [10]

Наявність у складі світлодіодних ламп різних типів випромінювачів, дозволяє змінювати спектральний склад і інтенсивність випромінювання, що дає можливість створювати енергоефективні керовані випромінювальні установки.

Для визначення балансу білого чи кольорового підсвічування і щоб відстежувати зміни кольору, викликані температурними характеристиками RGB - світлодіодної підсвітки та погіршенням продуктивності окремих складових в RGB-джерелі, Hamamatsu забезпечує кольорові сенсорні модулі фотоприймачів серії C9303 (тип RGB, серія C9303) [12]. На основі цих пропозицій стає можливим зворотній зв'язок, що контролює рівень освітлення кожного світлодіоду із RGB джерела, стабілізує колір на підсвічуванні в площині листа рослини. Серія C9303 має невеликий розмір, який легко можна

встановити збоку оптичного підсвічування. Форма та коефіцієнт підсилення RGB можуть бути виконані відповідно до специфікацій замовників [12]. Можливо також вимірювання цифрової інформації RGB за кольором об'єкта (таку функцію дозволяє реалізувати модель RGB - приймача C9315). Кольоровий модуль датчика C9315 робить це завдання простим шляхом цифрового перетворення кольору об'єкта. C9315 використовує метод, подібний до методу прямого зчитування величини стимулу для виявлення і дозволяє просте управління кольором джерела. Цей метод є повністю практичним для застосувань, які контролюють колір шляхом відносного порівняння з різницею кольорів непрозорих об'єктів з близьким спектральним відбиттям [12]. Внутрішній триколовий датчик RGB-фотодіодів розпізнає світло від джерела чи об'єкта, освітленого білим світлодіодом, та видає цифрові дані на управління RGB-джерелом. C9315, підключений до ПК, підходить для простого управління кольором та виявлення різниці кольорів із відносно різним спектральним відбиттям. C9315 не можна використовувати для виявлення абсолютного кольору джерела з неперервним спектром. Вихід з C9315 - це 12-бітові цифрові дані, що відповідають RS-232C. Ці дані завантажуються в ПК за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке постачається разом із C9315. Число, що відповідає перетвореній інформації, також може бути передане в режимі реального часу безпосередньо в електронну таблицю Microsoft Excel [12].

Схема оцінки датчика кольорів Hamamatsu Evaluation Board C9331.

C9331 - це плата Evaluation Board, призначена для оцінки функціональності RGB триколових датчиків Hamamatsu (S7505-01, S9032-02). Вона має триканальний підсилювач перетворення струму в напругу, який одночасно перетворює кожен компонент фотострумів RGB в напругу і виводить його на вхід АЦП. Три аналогові тримери призначені для

регулювання коефіцієнта збільшення сигналу фотоструму для окремих компонентів кольорів RGB.

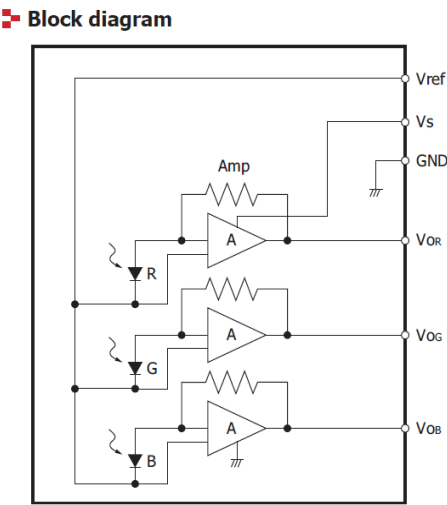


Рис. 30 – Електрична принципова схема HAMAMATSU C9303 [13]

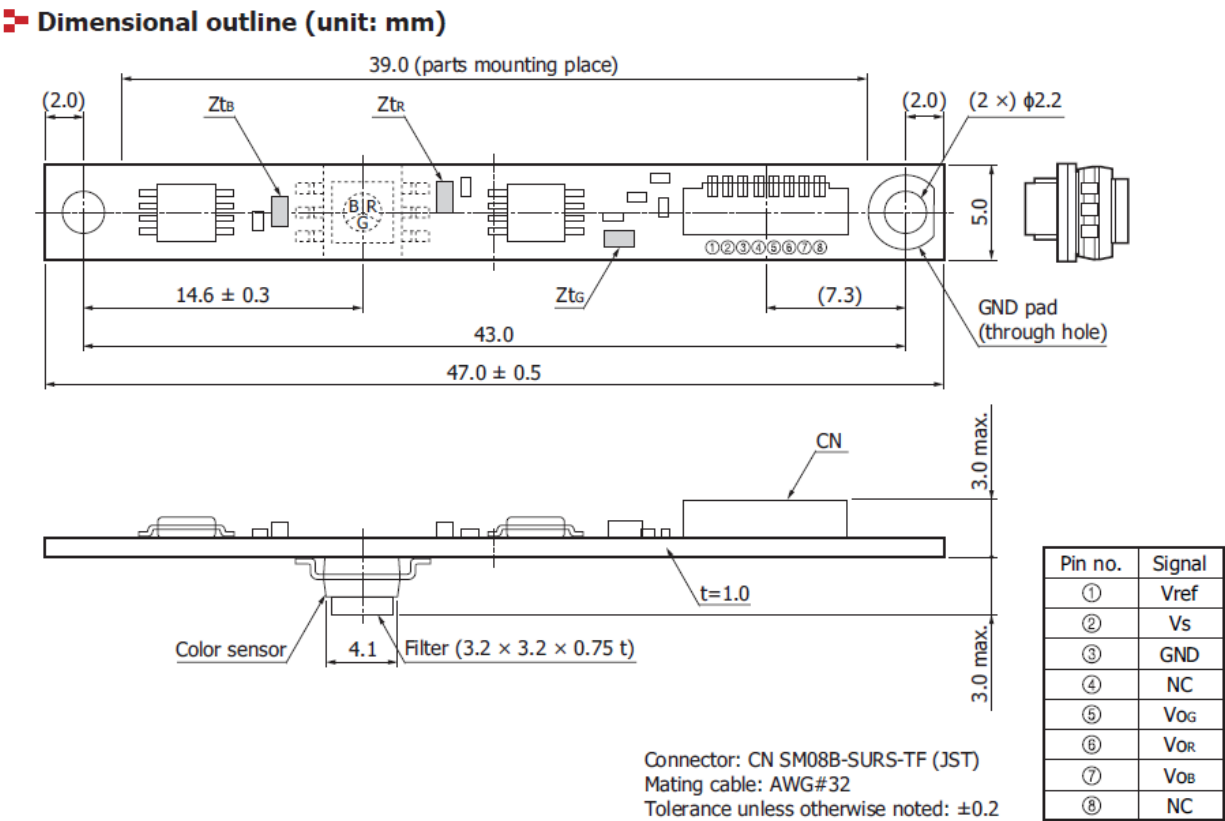


Рис. 31 – Компонентної схема HAMAMATSU C9303 [13]

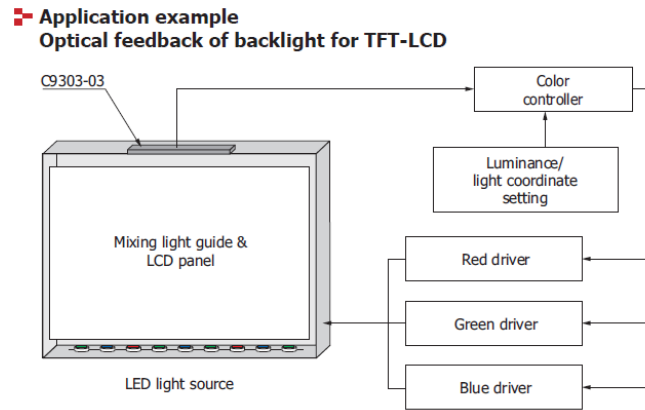


Рис. 32 – Приклад використання оптичного зворотного зв'язку підсвітки TFT-LCD [13]

Приклад структурної схеми запропонованої в цій роботі системи штучного освітлення на основі RGB – джерела та мікроелектронних фотоприймачів в фіто активному спектральному діапазоні реалізації наведено на рис.33.

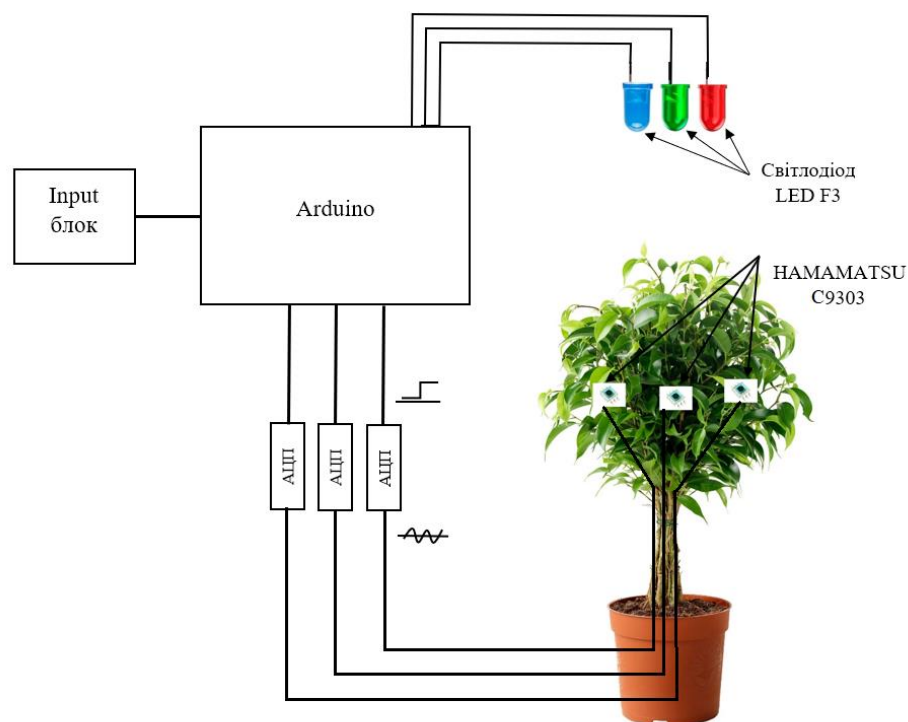


Рис. 33 - Структурна схема системи штучного освітлення на основі RGB – джерела, контролера ARDUINO та мікроелектронних фотоприймачів в фіто-активному спектральному діапазоні

РЕЗУЛЬТАТИ, ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

За результатами проведеної роботи встановлено, що створення систем штучного освітлення, які забезпечують оптимальні умови розвитку рослин і енергетичну ефективність технологічного процесу, є актуальним завданням сучасності. Задача на сьогоднішній день остаточно не роз'язана, на ринку відсутні закінчені системи, що реалізують подібну функцію. В роботі проаналізовано сучасний стан галузі, наявність джерел та фотоприймачів у фітоактивному діапазоні, які б дозволили реалізувати систему в режимі автоматичного управління зі зворотним зв'язком за спектральними характеристиками освітленості. В роботі показано доцільність використання світлодіодних освітлювачів та фотодіодних мікроелектронних фотоприймачів, що реалізують спектральну функцію фотоприймача за схемою RGB. Така конфігурація системи штучного освітлення надає технічну можливість покращення фіто- та енерго-ефективного досвічування за рахунок використання спектральних складових, виключно потрібних для поточної стадії розвитку рослини. В роботі запропоновано нову структурну схему реалізації схеми досвічування в фітоактивному діапазоні з використанням RGB – освітлювача, сучасних мікроелектронних фотоприймачів електромагнітного випромінювання HAMAMATSU C9303, програмованого контролера, блоку задавання вхідних та вихідних параметрів регулювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Patent No.: US 9854749/B2, Date of patent: Jan. 2, 2018, PLANT GROWTH LIGHTING DEVICE AND METHOD// Inventors: Nicholas Peter Klase, Austin, TX (US); Dung T. Duong, Bee Cave, TX (US); Emil Radkov, Kyle, TX (US)
2. Wikipedia. [Електронний ресурс]: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственное_освещение_растений
3. Patent No.: US2010/0031562A1, Pub. Date: Feb. 11, 2010, CROP LIGHTING // Inventors: Randolph Antonio Marcus Browne, Lichtenvoorde(NL); Petrus Gerardus Maria Wolberink, Groenlo (NL); Antonius Marinus Telgenhof Oude Koehorst, Hengelo (NL)
4. PatentNo.: RU2640960C2, Заявка: 17.12.2013, ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПО МЕНЬШЕЙ МЕРЕ С ОДНОЙ СИСТЕМОЙ ОСВЕЩЕНИЯ// Авторы: Крейн МарселлинуcПетрусКаролусМихал (NL); Петерс Хенрикус Мари (NL); Ван Эчтелт Эстер Мария (NL)
5. LICOR. [Електронний ресурс]: <https://www.licor.com/env/products/light/>
6. Laser Components L1X/2X Series Multi-Channel Current Mode Pyroelectric Detectors
7. Laser Components L3X/4X Series Multi-Channel Voltage Mode Pyroelectric Detectors
8. Laser Components GmbH “Infrared components”, Patric Paul
9. Михайленко М.М., Огляд існуючих джерел та пристроїв для досвічування рослин в умовах захищеного ґрунту // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. - 2017. - Вип. 17, т. 2.

10. Мазур О. В., Рогачук О. О., Формування енергоефективного штучного освітлення рослин та методика вимірювання його параметрів // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. - 2015. - Vol. 7, № 2. - С. 52-60.
11. Добровольский Ю. Г., Первичные преобразователи для измерения энергетических характеристик оптического излучения: 05.09.07 "Светотехника и источники света" // Добровольский Юрий Георгиевич; Научно-производственная фирма «Тензор». - Черновцы, 2015.
12. HAMAMATSU. [Електронний ресурс]: https://www.hamamatsu-news.de/hamamatsu_optosemiconductor_handbook/288/#zoom=z
13. HAMAMASTU, No. KACC1112E05, DATASHEET (Rev. 1/2019-AUG) // Color sensor module C9303-03